

مدل‌سازی جریان گذرای تراکم‌پذیر گاز ایده‌آل در یک خط لوله انشعاب‌دار فشار بالا

بابک افزلی^۱ و حسن کریمی^۲

دانشکده مهندسی هوافضا

پژوهشکده مهندسی سامانه‌های نیرو و پیشرانس

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۸۸/۸/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۴/۱۸)

چکیده

امروزه در اکثر فرآیندهای صنعتی از لوله‌های انتقال سیال استفاده می‌شود. در این میان، جریان تراکم‌پذیر گازی کاربرد بسیار گسترده‌ای در این زمینه دارد. فرآیندهای شیمیایی، نیروگاهی، لوله‌های انتقال گاز طبیعی و لوله‌های انتقال بخار فشاربالا، از این جمله هستند. در اکثر این موارد، فرآیندهای کنترلی روی سیستم انتقال سیال به همراه انشعابات و شیرهای کنترلی اعمال می‌شود. بنابراین، در فرآیندهای گذرا، آگاهی از نحوه رفتار سیال تراکم‌پذیر در عبور از لوله‌ها برای تعیین توابع کنترلی اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق، سعی بر آن است تا با استخراج معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم‌پذیر، روشی برای مدل‌سازی فرآیندهای گذرا ارائه شود. برای مدل‌سازی جریان تراکم‌پذیر گاز ایده‌آل درون لوله‌های با مقطع ثابت به همراه اصطکاک، از روش اختلاف محدود مک کورمک استفاده شده است. همچنین، با ترکیب روش‌های موجود، مانند روش‌های مک کورمک و مشخصه‌ها، روشی برای مدل‌سازی جریان گذرای سیال تراکم‌پذیر گاز ایده‌آل در عبور از انشعاب‌ها ارائه شده است. در پایان، یک نمونه تئوری و یک نمونه صنعتی از مدار انتقال گاز طبیعی به همراه انشعاب و شیرهای کنترلی در شرایط مختلف و در فرآیندهای متفاوت بررسی شده و نتایج حل ارائه شده است. همچنین، نحوه تأثیر پارامترهای شرایط مرزی بر مشخصات جریان، مانند دبی و فشار، بررسی و تحلیل نهایی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی دینامیکی، خطوط لوله تحت فشار، لوله انشعاب‌دار، جریان تراکم‌پذیر

Simulation of Transient Compressible Ideal Gas Flow in a High Pressure Branched Pipeline

B. Afzali and H. Karimi

Aerospace Eng. Dep't.

Power & Propulsion Systems Research Center

K.N. Toosi Univ. of Tech.

(Received: 20 Nov. 2009; Accepted: 9 Jul. 2011)

ABSTRACT

Nowadays, compressible flow transmission pipelines are used in many industrial processes. Pipelines in chemical processes, gas turbine power plants, natural gas transmission lines, and high pressure steam transmission pipelines are some industrial examples. Therefore, learning the manner of treatment of a transient compressible fluid flow in pipelines with junctions and branches is important. In this paper, the attempt is to derive the governing equations in compressible fluid flow in a fixed area pipeline in the presence of friction. To achieve this, a numerical method of analysis (McCormack) is used. Also the method of characteristics is added to solve the problem in the junctions. Finally, a theoretical case and an industrial one are investigated and some common transient processes are simulated. In addition, the effects of boundary conditions on the flow characteristics, such as pressure and flow rates, are presented.

Keywords: Dynamic Simulation, High Pressure Pipelines, Compressible Flow, Branched Pipelines

۱- دانشجوی دکترا: b_afzali@dena.kntu.ac.ir

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): karimi@kntu.ac.ir

فهرست علائم

۱- مقدمه

تحلیل جریان گذرای سیال تراکم‌پذیر گاز ایده‌آل در عبور از لوله‌ها، نیازمند استخراج روابط حاکم بر جریان به همراه اعمال فرضیات ساده‌کننده‌ای است که علاوه بر ساده‌سازی تحلیل، خطای قابل قبولی داشته باشند. روابط اصلی حاکم بر جریان، شامل روابط پیوستگی جرم، اندازه حرکت و انرژی به همراه رابطه حالت گاز ایده‌آل می‌باشد. در این میان استفاده از فرض جریان بی‌دررو درون لوله‌ها به همراه فرض جریان دما ثابت، از جمله مهم‌ترین فرضیات ساده‌کننده‌ای است که برای تحلیل جریان درون لوله‌ها استفاده می‌شود. در سال ۱۹۴۳ اولین راه‌حل برای تحلیل جریان گاز در خط لوله افقی توسط لیپل^۱ ارائه شده است [۱]. وی معادلات را برای دو حالت مختلف دما ثابت و بی‌دررو که ممکن است در عمل رخ دهد تحلیل نمود و نتیجه گرفت که برای لوله‌های کوتاه فرض جریان بی‌دررو نسبت به فرض جریان دما ثابت منطقی‌تر است. در سال ۱۹۷۹ فینچام و گلدواتر^۲ نیز نشان دادند که برای لوله‌های بلند و طولانی فرض جریان دما ثابت دقت بیشتری را ارائه می‌دهد [۲]. همچنین در سال ۱۹۹۹ توماس^۳ در کتاب خود با عنوان «روش‌های مدل‌سازی صنعتی»، روش مناسبی را برای تحلیل جریان تراکم‌پذیر در عبور از شیر کنترل با توجه به اطلاعات موجود از شیرها ارائه نمود [۳]. در سال ۱۹۹۹ پرایس و مک‌براین^۴ در مقاله خود به بیان روابطی برای به‌دست‌آوردن ضریب اصطکاک مؤثر در تحلیل گذرای جریان در خطوط لوله انتقال سیال پرداختند [۴]. در سال ۲۰۰۱ نیز اوسیاداج و چاکریکوفسکی^۵ در مقاله‌ای به بیان تفاوت‌های میان نتایج حاصل از تحلیل گذرای جریان گاز در خطوط لوله، با در نظر گرفتن دو فرض ساده‌کننده جریان دما ثابت و جریان بی‌دررو در تحلیل جریان پرداختند [۵]. همچنین به‌عنوان نمونه از کارهایی که در زمینه تحلیل گذرای جریان فشار بالای گاز طبیعی در لوله‌های انتقال گاز انجام شده است می‌توان به مقاله گاتو و هنریکز^۶ اشاره نمود که در سال ۲۰۰۵ به مدل‌سازی عددی

علائم لاتین

A	مساحت داخلی لوله [m ²]
A _t	مساحت گلوگاه شیر / اریفیس [m ²]
c	سرعت محلی جریان [m/s]
C _{CFL}	عدد کورانته (CFL)
C _d	ضریب تخلیه اریفیس
C _g	ضریب حد هدایت شیر برای سیال گازی [m ²]
C _{G(1,4)}	ضریب هدایت شیر برای هوا در حالت کاملاً باز [m ²]
C _{son}	سرعت محلی صوت [m/s]
D	قطر داخلی لوله [m]
f	ضریب اصطکاک معادله دارسی- ویسباخ
K _v	ضریب افت سرعت شیر
P ₁	فشار ورودی شیر / اریفیس / لوله [Pa]
P ₂	فشار خروجی شیر / اریفیس / لوله [Pa]
P _{Junc}	فشار در محل اتصال / انشعاب [Pa]
P _t	فشار گلوگاه شیر [Pa]
P _{tc}	فشار بحرانی گلوگاه شیر / اریفیس [Pa]
R	ثابت گاز [J/kg.K]
Re	عدد رینولدز
T	دما [K]
T ₀₁	فشار سکون شیر در بخش ورودی [K]
t	زمان [s]
v	حجم مخصوص [m ³ /kg]
V	سرعت محلی جریان گاز [m/s]
W	دبی عبوری از شیر [kg/s]
x	بعد مکان [m]
y	نسبت بازشدگی شیر

علائم یونانی

ε	زبری لوله [m]
γ	نسبت گرمایی گاز
ρ	چگالی [kg/m ³]
θ	زاویه جریان با افق [rad]

زیرنویس‌ها و بالا نویس‌ها

e	بخش خروجی
i	گام مکانی
j	گام زمانی
n	گام زمانی

- 1- Lapple
- 2- Fincham & Goldwater
- 3 Thomas
- 4- Price & McBrien
- 5- Osiadacz & Chaczikowsky
- 6- Gato & Henriques

جریان داخل لوله) در راستای طولی x افزاز می‌شود. سپس دسته معادلات فوق برای هر نقطه از جریان در این دامنه به کمک روش اختلاف محدود "مک کورمک" گسسته می‌شوند. این گسسته‌سازی در هر نقطه در دو مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله پیش‌گویی، معادلات فوق با توجه به مقادیر هر نقطه و نقطه بعدی با روش پیش‌رو و سپس در مرحله تصحیح، از روی مشخصات به‌دست آمده در مرحله قبل برای نقطه مذکور و نقطه قبل آن به روش پس‌رو گسسته می‌شوند. به این ترتیب از روی مقادیر مشخصات جریان در زمان قبل، مقادیر مشخصات در گام زمانی جدید قابل دستیابی است. معادلات نهایی که به کمک روش اختلاف محدود مک کورمک گسسته‌سازی شده و برای محاسبه مقادیر پارامترهای جریان گاز درون خط لوله ساده مستقیم شکل استفاده می‌شوند در دو مرحله پیش‌گویی و اصلاح در روابط (۱۰-۴) ارائه شده‌اند.

پیش‌بینی کننده:

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_i^n = -\rho_i^n \frac{V_{i+1}^n - V_i^n}{\Delta x} - V_i^n \frac{\rho_{i+1}^n - \rho_i^n}{\Delta x}, \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial t}\right)_i^n = -V_i^n \frac{V_{i+1}^n - V_i^n}{\Delta x} - R \left[\frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x} + \frac{T_i^n}{\rho_i^n} \frac{\rho_{i+1}^n - \rho_i^n}{\Delta x} \right] - f \frac{V_i^n |V_i^n|}{2D}, \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i^n = -V_i^n \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x} - (\gamma - 1) T_i^n \frac{V_{i+1}^n - V_i^n}{\Delta x}, \quad (6)$$

$$\rho_i^{n+1} = \rho_i^n + \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_i^n \times \Delta t,$$

$$V_i^{n+1} = V_i^n + \left(\frac{\partial V}{\partial t}\right)_i^n \times \Delta t, \quad (7)$$

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i^n \times \Delta t.$$

تصحیح کننده:

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_i^{n+1} = -\rho_i^{n+1} \frac{V_i^{n+1} - V_{i-1}^{n+1}}{\Delta x} - V_i^{n+1} \frac{\rho_i^{n+1} - \rho_{i-1}^{n+1}}{\Delta x}, \quad (8)$$

جریان یک‌بعدی گذرای سیال تراکم‌پذیر فشار بالا پرداخته‌اند. آن‌ها برای حل معادلات پیوستگی از روش رانگ-کوتای ناپیوسته گالرکین^۱ با دقت مرتبه سوم زمانی استفاده نمودند [۶]. یکی از کارهای مهم در این زمینه را تورلی و تیلی^۲ در سال ۱۹۸۷ انجام داده‌اند. آن‌ها در مقاله خود [۷] به بررسی روش‌های موجود برای تحلیل و مدل‌سازی رفتار جریان گاز در خطوط لوله پرداختند. مزایا و معایب هر روش را به‌طور مختصر بیان کرده و فرض‌های ساده‌کننده‌ای که موجب بروز خطا در نتایج می‌شوند را بررسی نمودند. همچنین در ادامه مرور این روش‌ها، به مقایسه نتایج حاصل از هر روش با نتایج حاصل از آزمایش پرداخته‌اند. در این مقاله به بیان روشی برای مدل‌سازی جریان تراکم‌پذیر گاز ایده‌آل در عبور از لوله‌های ساده و نیز انشعابات خواهیم پرداخت.

۲- مدل‌سازی جریان گذرای گاز ایده‌آل در لوله‌ها به

روش اختلاف محدود

ابتدا باید فرم مناسبی از معادلات حاکم بر روش^۳ جریان در خطوط لوله انتقال گاز ارائه شود به‌نحوی که بتوان از روش اختلاف محدود مک کورمک برای حل این معادلات استفاده نمود. برای این منظور از فرم غیربقائی معادلات پیوستگی، سرعت حرکت و انرژی استفاده می‌شود. شکل غیربقائی این معادلات را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت [۸-۹].

شکل غیربقائی معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{\partial \rho}{\partial x}, \quad (1)$$

فرم غیربقائی معادله سرعت:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -V \frac{\partial V}{\partial x} - R \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) - f \frac{V |V|}{2D}, \quad (2)$$

فرم غیر بقائی معادله انرژی:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -V \frac{\partial e}{\partial x} - RT \frac{\partial V}{\partial x} \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = -V \frac{\partial T}{\partial x} - (\gamma - 1) T \frac{\partial V}{\partial x}, \quad (3)$$

که در آن‌ها، V سرعت، ρ چگالی، T دما، R ثابت گاز، t زمان، x طول، γ نسبت گرمایی ویژه و f ضریب اصطکاک می‌باشد که با فرض جریان مغشوش مقداری ثابت خواهد داشت [۳]. روش حل به این صورت است که ابتدا دامنه حل

1- Runge-Kutta Discontinuous Galerkin Method

2- Thorley & Tiley

3- Regime

۳- تحلیل جریان گذرای گاز ایده‌آل در اتصال دو یا چند خط لوله

در خطوط لوله انتقال سوخت گاز طبیعی به‌طور معمول، از انشعابات مختلفی استفاده می‌شود. جریان‌های کنارگذر فرعی، شیرهای اطمینان و همچنین ابزارآلات تقسیم جریان و هدایت آن به سمت واحدهای مختلف سیستم و یا مشعل‌های مختلف در هر واحد به عنوان مثال از این جمله کاربرد انشعابات در خطوط لوله انتقال گاز در یک نیروگاه می‌باشد. از جمله مهم‌ترین این موارد (که در ادامه به عنوان مثال صنعتی بر روی آن تمرکز خواهیم کرد)، انشعاب جریان و تقسیم آن برای مشعل‌های جریان نفوذ، پیش-مخلوط و جریان پایلوت می‌باشد. با توجه به نحوه عملکرد توربین گاز، هر یک از این انشعابات در زمان‌های مختلف هدایت‌گر جریان سوخت گازی به سمت مشعل‌های مربوطه خواهند بود. از آن‌جا که تحلیل دینامیکی و گذرا در مدار انتقال مدنظر می‌باشد، بنابراین تحلیل گذرای جریان تراکم-پذیر گاز طبیعی در عبور از انشعابات مورد نیاز است. روابطی که در حل جریان عبورکننده از اتصال چندین خط لوله به‌کار می‌روند به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

معادله بقای جرم [۳]:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = v^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c}{v} \right), \quad (16)$$

معادله بقای مومنتم [۳]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{c}{v} \right) = -\frac{\partial}{\partial x} \left(P + \frac{c^2}{v} \right) - \frac{2c|c|}{vD} f - \frac{g}{v} \sin \theta. \quad (17)$$

اگر یک لوله ساده با سطح مقطع ثابت را به N نقطه مجزا جدا کنیم، معادلات حاکم بر المان سیال در هر نقطه را می‌توان به‌صورت دسته معادلات بقای جرم، انرژی و سرعت تعریف نمود. آن‌چه مشخص است این سه معادله باید به‌طور هم‌زمان برای یک المان سیال در مدار حل شوند. اما برای ساده‌سازی مسأله و کاهش زمان حل می‌توان از فرض‌های ساده‌کننده استفاده نمود. یکی از این فرض‌ها، فرض جریان دما ثابت درون انشعاب است. بدین ترتیب می‌توان گفت که معادله بقای انرژی معادله‌ای است که همواره برقرار بوده و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. حال با در نظر گرفتن روابط

$$\left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_i^{n+1} = -V_i^{n+1} \frac{V_i^{n+1} - V_{i-1}^{n+1}}{\Delta x} - R \left[\frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{T_i^{n+1}}{\rho_i^{n+1}} \frac{\rho_i^{n+1} - \rho_{i-1}^{n+1}}{\Delta x} \right] - f \frac{V_i^{n+1} |V_i^{n+1}|}{2D}, \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_i^{n+1} = -V_i^{n+1} \frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{\Delta x} - (\gamma - 1) T_i^{n+1} \frac{V_i^{n+1} - V_{i-1}^{n+1}}{\Delta x}. \quad (10)$$

بدین ترتیب، مقادیر نهایی به‌صورت زیر بدست می‌آید:

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_{ave} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_i^n + \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_i^{n+1} \right] \quad (11)$$

$$\rho_i^{n+1} = \rho_i^n + \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_{ave} \times \Delta t,$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_{ave} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_i^n + \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_i^{n+1} \right] \quad (12)$$

$$V_i^{n+1} = V_i^n + \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_{ave} \times \Delta t,$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{ave} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_i^n + \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_i^{n+1} \right] \quad (13)$$

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{ave} \times \Delta t.$$

بنابراین یک روش صریح پیش‌رو در زمان خواهیم داشت که می‌تواند با توجه به شرایط اولیه، شرایط مرزی و اغتشاشات درونی و بیرونی در هر لحظه به‌صورت نقطه‌به‌نقطه جریان را تحلیل کند. معادله نهایی که دسته معادلات فوق را کامل خواهد کرد، معادله حالت گاز می‌باشد. با فرض گاز ایده‌آل معادله حالت به‌صورت زیر خواهد بود [۸]:

$$Pv = RT. \quad (14)$$

برای محاسبه گام زمانی پیش‌رو نیز باید توجه داشت که روش مک‌کورمک همان‌طور که بیان شد یک روش صریح می‌باشد که شرط پایداری آن بر طبق عدد کورانت به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [۹]:

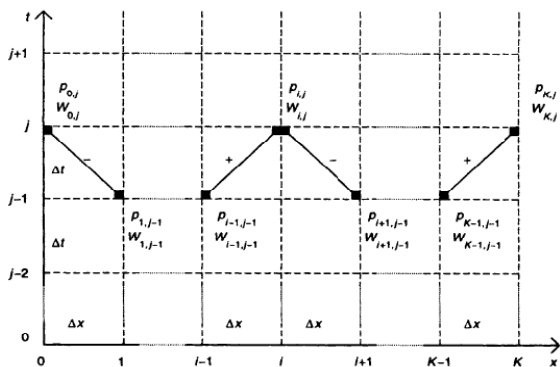
$$\frac{(C_{CFL}) \Delta x}{\Delta t} \geq V + C_{son}, \quad C_{CFL} = \text{courant number}. \quad (15)$$

لوله‌های انتقال کمتر از 10 m/s است یعنی کمتر از $2/5\%$ سرعت صوت ($c/c_{son} < 2.5\%$). در نتیجه می‌توان از سرعت سیال در مقابل سرعت صوت صرف‌نظر نمود. این فرض اگرچه باعث می‌شود منحنی‌های مشخصه چپ و راست در هر نقطه با خط راست تقریب زده شده و باعث بروز خطا شود اما اولاً مقدار این خطا ناچیز بوده و ثانیاً این فرض مزیت‌هایی دارد. از جمله این‌که منحنی‌های مشخصه علاوه بر مستقیم‌الخط بودن با زمان نیز تغییر نمی‌کنند [۳]. این نتیجه که خطوط مشخصه، خطوطی مستقیم هستند این امکان را فراهم می‌سازند که بتوان یک شبکه متقاطع با مش‌بندی مستطیلی در بعد مکان و زمان همانند شکل ۱ رسم نمود. در این شبکه معادله (۲۰) در طول تمام مشخصه‌های پیش‌رو (+) و معادله (۲۱) نیز برای تمام مشخصه‌های پس‌رو (-) برقرار خواهند بود. حال با استفاده از روابط اختلاف محدود، مشتقات زمانی بر حسب تقریب‌های اختلاف محدود به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{1}{c_{son}} \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j-1}}{\Delta t} + \frac{1}{A} \frac{W_{i,j} - W_{i-1,j-1}}{\Delta t} + \frac{2f}{A^2 D} v_{i-1,j-1} W_{i-1,j-1} |W_{i-1,j-1}| + \frac{g}{v_{i-1,j-1}} \sin \theta = 0, \quad (22)$$

$$-\frac{1}{c_{son}} \frac{P_{i,j} - P_{i+1,j-1}}{\Delta t} + \frac{1}{A} \frac{W_{i,j} - W_{i+1,j-1}}{\Delta t} + \frac{2f}{A^2 D} v_{i+1,j-1} W_{i+1,j-1} |W_{i+1,j-1}| + \frac{g}{v_{i+1,j-1}} \sin \theta = 0. \quad (23)$$

در معادله (۲۲)، در طول مشخصه‌های پیش‌رو و معادله (۲۳)، در طول مشخصه پس‌رو معتبر می‌باشند.



شکل (۱): شبکه متقاطع با مش‌بندی مستطیلی در بعد مکان و زمان.

حاکم بر دبی، سرعت، سرعت صوت و نیز اعمال معادله حالت گاز کامل بر روابط فوق، روابط پیوستگی و سرعت به ترتیب به‌صورت زیر خواهند شد [۳]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{c_{son}^2}{A} \frac{\partial W}{\partial x} = 0, \quad (18)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} \left(1 - \frac{v^2}{c_{son}^2} \frac{W^2}{A^2} \right) + \quad (19)$$

$$2v \frac{W}{A^2} \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{2vf}{A^2 D} W |W| + \frac{g}{v} \sin \theta = 0,$$

که در آن، P فشار، v حجم مخصوص گاز، W دبی جرمی جریان، c_{son} سرعت محلی صوت، D و A به ترتیب قطر و سطح مقطع لوله، f ضریب اصطکاک، g شتاب گرانش، θ زاویه جریان با افق، x بعد مکان و t زمان می‌باشد. برای حل معادلات به‌دست آمده برای پیوستگی و سرعت، به‌جای حل جداگانه آن‌ها، یک ترکیب خطی از این معادلات در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه فشار و دبی توابعی از مکان و زمان می‌باشند ترکیب خطی معادلات فوق و مرتب‌سازی آن‌ها دو معادله زیر را برای مشخصه‌های چپ و راست به‌دست می‌دهد [۳ و ۸]:

$$-c + c_{son} \frac{dP}{dt} + \frac{1}{A} \frac{dW}{dt} + \frac{2vf}{A^2 D} W |W| + \frac{g}{v} \sin \theta = 0, \quad (20)$$

$$-c - c_{son} \frac{dP}{dt} + \frac{1}{A} \frac{dW}{dt} + \frac{2vf}{A^2 D} W |W| + \frac{g}{v} \sin \theta = 0, \quad (21)$$

که در آن، c سرعت محلی جریان می‌باشد. معادله (۲۰) برای مشخصه‌های پیش‌رو ($\frac{dx}{dt} = c + c_{son}$) و معادله (۲۱) برای مشخصه‌های پس‌رو ($\frac{dx}{dt} = c - c_{son}$) معتبر است. با توجه به

فرض جریان دما ثابت، مشخص است که می‌توان سرعت صوت را در طول مسیر حرکت سیال ثابت فرض کرد (چرا که سرعت صوت در گاز کامل فقط تابع دما و مشخصات فیزیکی سیال می‌باشد). با توجه به روابط به‌دست آمده منحنی‌های مشخصه‌ای تعریف می‌شوند که در حالت کلی خط مستقیم نمی‌باشند. در اینجا با توجه به این نکته که سرعت سیال گازی شکل در لوله‌های بلند انتقال گاز عموماً بسیار کوچک‌تر از سرعت صوت می‌باشد از فرض ساده‌کننده دیگری استفاده می‌شود. برای مثال سرعت صوت در گاز طبیعی در حدود 400 m/s می‌باشد. در مقابل سرعت سیال گازی شکل در

از طرف دیگر، برای لوله‌هایی که به‌طور طبیعی جریان را از اتصال مذکور خارج می‌کنند از مشخصه‌های پس‌رو استفاده می‌شود. برای این لوله‌ها که اصطلاحاً لوله‌های خروجی نامیده می‌شوند از بالانویس (B,s) استفاده می‌شود. حرف B به خروجی بودن این لوله‌ها اشاره دارد و پارامتر s نشان‌دهنده شماره لوله بوده و مقادیر $s=1,2,\dots,K$ را می‌تواند داشته باشد. بدین ترتیب با استفاده از رابطه (۲۳) و جایگزینی مقدار $i=0$ برای نقاط ابتدایی لوله‌های خروجی خواهیم داشت:

$$-\frac{1}{C_{son}} \frac{P_{0,j}^{(B,s)} - P_{1,j-1}^{(B,s)}}{\Delta t} + \frac{1}{A^{(B,s)}} \frac{W_{0,j}^{(B,s)} - W_{1,j-1}^{(B,s)}}{\Delta t} + \frac{2f}{\left(A^{(B,s)}\right)^2 D^{(B,s)}} v_{1,j-1}^{(B,s)} W_{1,j-1}^{(B,s)} \left| W_{1,j-1}^{(B,s)} \right| = 0 \quad (25)$$

for $s=1,2,\dots,S$

حال بایستی معادلات فوق، هم‌زمان حل شوند. صرف‌نظر از افت فشار جریان در اتصال مذکور، محل تقاطع لوله‌ها یک منطقه هم فشار است. این بدان معنی است که فشار نقاط انتهایی در لوله‌های ورودی با فشار نقاط ابتدایی در لوله‌های خروجی برابر خواهد بود. رابطه زیر این تعادل فشار را بیان می‌کند:

$$P_{K,j}^{(A,r)} = P_{0,j}^{(B,s)} = P_{JUNC,j} \quad (26)$$

for $r=1,2,\dots,R; s=1,2,\dots,S$.

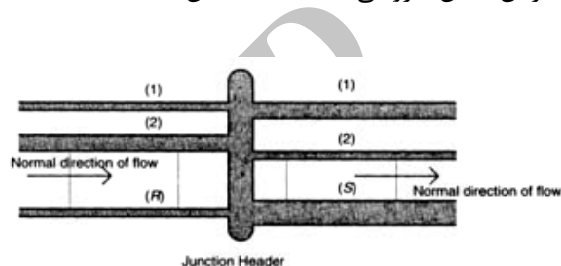
با در نظر گرفتن قانون بقای جرم، جمع جبری دبی‌های ورودی به اتصال و خروجی از آن صفر خواهد بود. رابطه (۲۷) این مسأله را بیان می‌کند.

$$\sum_{r=1}^R W_{K,j}^{(A,r)} - \sum_{s=1}^S W_{0,j}^{(B,s)} = 0 \quad (27)$$

حال اگر معادله (۲۴) برای تمام لوله‌های ورودی نوشته و معادلات به‌دست آمده با هم جمع شوند رابطه (۲۸) به دست می‌آید. در این روابط از جمله $\sin\theta$ با توجه ناچیز بودن مقدار آن در مقطع اتصال لوله‌ها صرف‌نظر می‌شود.

$$\sum_{r=1}^R W_{K,j}^{(A,r)} + P_{JUNC,j} \frac{1}{C_{son}} \sum_{r=1}^R A^{(A,r)} = \left[\begin{array}{l} W_{K-1,j-1}^{(A,r)} + \frac{A^{(A,r)}}{C_{son}} P_{K-1,j-1}^{(A,r)} - \\ A^{(A,r)} \Delta t \times \left[\frac{2f^{(A,r)}}{\left(A^{(A,r)}\right)^2 D^{(A,r)}} v_{K-1,j-1}^{(A,r)} \right. \\ \left. \times W_{K-1,j-1}^{(A,r)} \left| W_{K-1,j-1}^{(A,r)} \right| \right] \end{array} \right] \quad (28)$$

حال اتصال نشان داده شده در شکل ۲ را در نظر می‌گیریم. در این اتصال چندین لوله مختلف با قطرهای متفاوت وارد انشعاب شده و چندین لوله مختلف با قطرهای متنوع از آن خارج می‌شوند. به‌صورت طبیعی، ورود و خروج جریان مطابق آن‌چه در شکل نشان داده شده از سمت چپ به راست می‌باشد. البته این یک قرارداد بوده و ممکن است خلاف این جهت اتفاق رخ دهد که در این صورت با علامت منفی نشان داده خواهد شد. جریان بخش ورودی با علامت R و جریان بخش خروجی با علامت S نشان داده شده است.



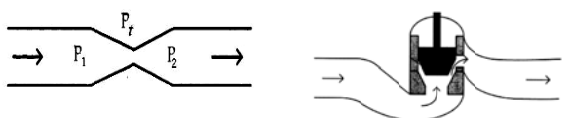
شکل (۲): شمای یک نمونه از اتصال چندین لوله مختلف با قطرهای متفاوت در خط لوله انتقال.

برای تحلیل جریان در چنین اتصالی از روش مشخصه‌ها که پیش‌تر توضیح داده شد استفاده می‌شود. برای این منظور مشخصه‌های پیش‌رو بر روی خطوط لوله‌ای که به‌طور طبیعی جریان را به سمت اتصال انتقال می‌دهند اعمال می‌شود. این لوله‌ها که اصطلاحاً لوله‌های ورودی نامیده می‌شوند از این پس با بالانویس (A,r) نمایش داده خواهند شد. حرف A نشان‌گر آن است که لوله مذکور در حالت طبیعی، جریان را به سمت اتصال هدایت می‌کند و پارامتر r نیز که می‌تواند مقادیر $r=1,2,\dots,R$ را داشته باشد، به شماره لوله‌ای که به آن ارجاع داده می‌شود اشاره دارد. حال با استفاده از رابطه (۲۲) و جایگزینی مقدار $i=K$ برای نقطه انتهایی هر لوله، با صرف‌نظر از جمله شیب جریان داریم:

$$\frac{1}{C_{son}} \frac{P_{K,j}^{(A,r)} - P_{K-1,j-1}^{(A,r)}}{\Delta t} + \frac{1}{A^{(A,r)}} \frac{W_{K,j}^{(A,r)} - W_{K-1,j-1}^{(A,r)}}{\Delta t} + \frac{2f}{\left(A^{(A,r)}\right)^2 D^{(A,r)}} v_{K-1,j-1}^{(A,r)} W_{K-1,j-1}^{(A,r)} \left| W_{K-1,j-1}^{(A,r)} \right| = 0 \quad (24)$$

for $r=1,2,\dots,R$

شیر در شکل ۳ نشان داده شده‌است. یک شیر کنترلی مانند یک نازل هم‌گرا-واگرا یک بخش هم‌گرای ورودی دارد، یک بخش واگرای خروجی دارد و یک مقطع میانی با عنوان گلوگاه که محدودکننده جریان می‌باشد. از این تشابه می‌توان در تحلیل جریان استفاده نمود (شکل ۳-ب). با این تفاوت که به علت هندسه نامناسب مقطع خروجی، در مقایسه با نازل ایده‌آل، جریان با وجود آنکه می‌تواند در گلوگاه شیر چوک شود، اما هیچ‌گاه در مقطع خروجی به سرعت مافوق صوت نخواهد رسید.



(الف) (ب)

شکل (۳): الف- شماتیک یک شیر کنترل سوپایی ب- نمای ساده شده از جریان داخل شیر.

در مورد شیرهای کنترلی که جریان گاز را از خود عبور می‌دهند معمولاً ضریبی با عنوان «ضریب حد هدایت شیر» ارائه شده و با C_g نشان داده می‌شود. با توجه به وابستگی این ضریب به نوع گاز عبوری، در اکثر مواقع مقدار آن برای جریان هوای عبوری از شیر در حالت کاملاً باز توسط سازنده آزمایش شده و ارائه می‌شود [۱۰]. این ضریب برای هر موقعیت بازشدگی شیر به صورت زیر به مساحت مقطع گلوگاه مربوط می‌شود [۳]:

$$C_g = A_t \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (31)$$

با فرض $\gamma=1.4$ برای هوا، مقدار مساحت گلوگاه شیر در حالت بازشدگی کامل به صورت رابطه (۳۲) به دست خواهد آمد:

$$A_t (Fully Open) = 1.4604 C_{G(\gamma=1.4)}, \quad (32)$$

که در آن، C_G ضریب ارائه شده برای هوا و در حالت کاملاً باز شیر می‌باشد. می‌توان رابطه (۳۳) را برای دبی جریان عبوری از شیر با نسبت بازشدگی (γ) به دست آورد [۳].

به همین ترتیب در صورتی که رابطه (۲۵) را برای تمام لوله-های خروجی نوشته و این روابط با هم جمع شوند، رابطه (۲۹) به دست خواهد آمد:

$$\sum_{s=1}^S W_{0,j}^{(B,s)} - P_{JUNC,j} \frac{1}{C_{son}} \sum_{s=1}^S A^{(B,s)} = \sum_{s=1}^S \left\{ W_{1,j-1}^{(B,s)} - \frac{A^{(B,s)}}{C_{son}} P_{1,j-1}^{(B,s)} - A^{(B,s)} \Delta t \right. \\ \left. \times \left[\frac{2f^{(B,s)}}{(A^{(B,s)})^2 D^{(B,s)}} v_{1,j-1}^{(B,s)} W_{1,j-1}^{(B,s)} \left| W_{1,j-1}^{(B,s)} \right| \right] \right\} \quad (29)$$

با تفریق دو معادله اخیر و هم‌چنین استفاده از معادله (۲۷) برای حذف جمله دبی جریان، رابطه (۳۰) که بیان‌کننده یک رابطه صریح برای محاسبه فشار در نقطه اتصال لوله‌ها می‌باشد، به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$P_{JUNC,j} = C_{son} \left(\frac{1}{\sum_{r=1}^R A^{(A,r)} + \sum_{s=1}^S A^{(B,s)}} \right) \times \left[\sum_{r=1}^R \left\{ W_{K-1,j-1}^{(A,r)} + \frac{A^{(A,r)}}{C_{son}} P_{K-1,j-1}^{(A,r)} - A^{(A,r)} \Delta t \times \right. \right. \\ \left. \left. \left[\frac{2f^{(A,r)}}{(A^{(A,r)})^2 D^{(A,r)}} v_{K-1,j-1}^{(A,r)} W_{K-1,j-1}^{(A,r)} \left| W_{K-1,j-1}^{(A,r)} \right| \right] \right\} \right. \\ \left. - \sum_{s=1}^S \left\{ W_{1,j-1}^{(B,s)} - \frac{A^{(B,s)}}{C_{son}} P_{1,j-1}^{(B,s)} - A^{(B,s)} \Delta t \times \right. \right. \\ \left. \left. \left[\frac{2f^{(B,s)}}{(A^{(B,s)})^2 D^{(B,s)}} v_{1,j-1}^{(B,s)} W_{1,j-1}^{(B,s)} \left| W_{1,j-1}^{(B,s)} \right| \right] \right\} \right] \quad (30)$$

بدین ترتیب، با به دست آمدن مقدار فشار در مقطع اتصال این چند لوله در گام زمانی Δt ، مقادیر مختلف دبی ورودی به نقطه اتصال و خروجی از آن با استفاده از معادلات (۲۸) و (۲۹) به دست خواهند آمد.

۴- مدل‌سازی جریان گاز در عبور از شیر کنترل

معمولاً در مدارهای کنترل‌شونده جریان سوخت گازی از شیرهای کنترلی سوپایی^۱ استفاده می‌شود. شماتیک این نوع

1- Globe Valve

۵-۱- تحلیل یک نمونه تئوری

در این قسمت نتایج تحلیل دینامیکی یک خط لوله مستقیم به همراه انشعاب ارائه می‌شود. جریان در این خط لوله یک جریان بی‌دررو به همراه اصطکاک در نظر گرفته می‌شود. شمای کلی مدار مورد بررسی در شکل ۴ نشان داده شده است. برای بررسی نتایج به دست آمده، چند حالت مختلف با شرایط گوناگون مورد بررسی قرار می‌گیرند. در اینجا نمونه مدار شکل ۴ با شرایط جدول ۱ در سه حالت مختلف تحلیل می‌گردد. شرایط این سه حالت در جدول ۱ آمده است. تفاوت این سه حالت در شرایط مختلف مرزی اعمال شده به مدار است. نمودار نحوه باز شدن شیرهای نشان داده شده در شکل ۴ به صورت شکل ۵ می‌باشد. در تمام حالت‌های ۱-۴ از جدول ۱، شیر مسیر اصلی به طور کامل باز می‌باشد.

جدول (۱): مشخصات هندسی مدار شکل ۴ به همراه شرایط مختلف مرزی اعمال شده.

$50 = L_{3-1}$	$50 = L_{2-1}$	$20 = L_{1-1}$
$50 = D_{3-1}$	$200 = D_{2-1}$	$250 = D_{1-1}$
$20 = L_{3-2}$	$20 = L_{2-2}$	$50 = L_{1-2}$
$50 = D_{3-2}$	$200 = D_{2-2}$	$250 = D_{1-2}$

حالت	T_{in} (K)	T_1 (K)	T_2 (K)	P_{in} (bar)	P_1 (bar)	P_2 (bar)
اول	300	273	310	21	12	14
دوم	300	273	310	21	14	14
سوم	300	273	310	21	10	14
چهارم	300	350	310	21	12	14

$$W = 2.065 y C_{G(1.4)} \times$$

$$\sqrt{\frac{\gamma P_1}{\gamma - 1} v_1 \left[\left(\frac{P_t}{P_1} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P_t}{P_1} \right)^{\gamma+1/\gamma} \right]}, \quad (33)$$

که در آن، W دبی، P فشار، v حجم مخصوص، γ نسبت گرمایی ویژه گاز، y درصد بازشدگی شیر و C_G ضریب حد هدایت گاز در حالت کاملاً باز شیر برای گاز عبوری هوا است که توسط سازنده ارائه می‌شود. پایین‌نویس‌های ۱ و t به ترتیب، بیان‌گر شرایط ورودی به شیر و گلوگاه شیر می‌باشند. همچنین نسبت فشار گلوگاه به فشار ورودی به کمک مشخصات شیر و نوع گاز عبوری از طریق روابط تجربی قابل محاسبه است [۳]. بیش‌ترین دبی عبوری از شیر (در هر نسبت بازشدگی) در زمان چوک شدن گلوگاه اتفاق می‌افتد که می‌توان مقدار این دبی و نیز نسبت فشار گلوگاه در زمان خفگی را به ترتیب از روابط (۳۴-۳۵) به دست آورد [۸ و ۱۱].

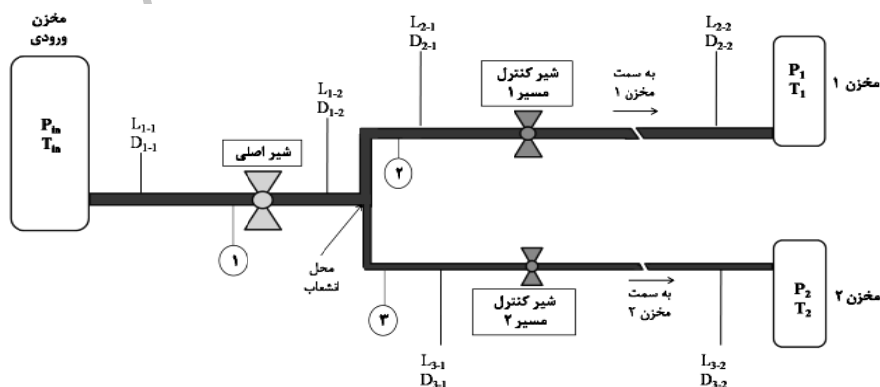
$$W_c = A_t \sqrt{\frac{P_1}{v_1} \gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}, \quad (34)$$

$$\frac{P_{tc}}{P_1} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad (35)$$

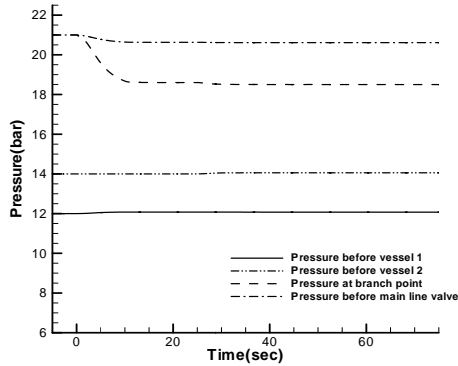
که در آن، A_t مساحت مقطع گلوگاه شیر در هر نسبت بازشدگی می‌باشد.

۵- نتایج تحلیل

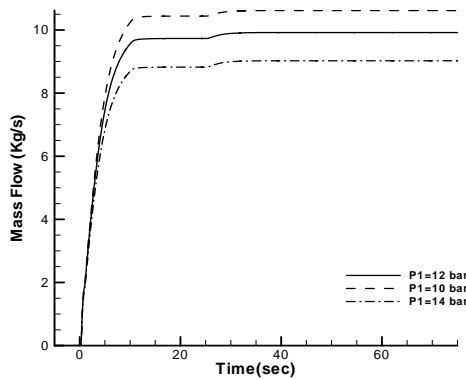
به عنوان مثالی از کاربرد روش مذکور، در ادامه نتایج تحلیلی حاصل از اعمال این روش برای حل یک نمونه تئوری و یک نمونه صنعتی تشریح خواهند شد.



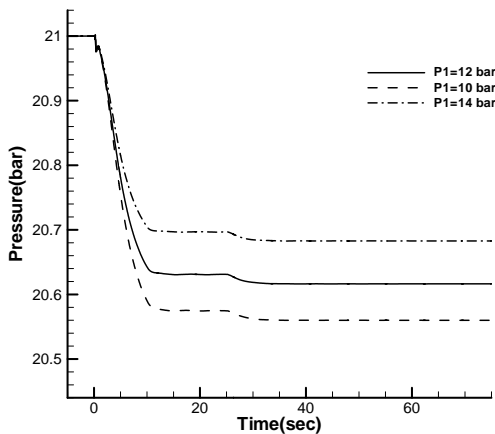
شکل (۴): نمایی از مدار مورد بررسی.



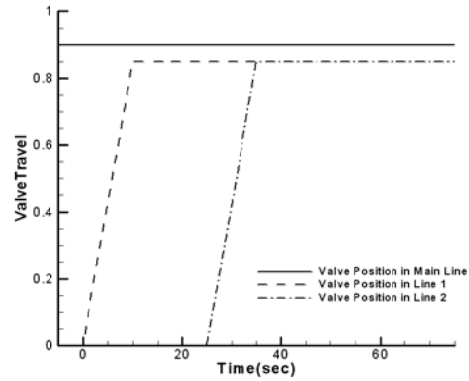
شکل (۷): تغییرات فشار پشت شیر خط اصلی، محل انشعاب و در ورودی مخازن ۱ و ۲ در حالت اول در جدول ۱.



شکل (۸): مقایسه‌ای از تغییرات دبی عبوری از خط اصلی در فرآیند باز شدن شیرهای مسیر ۱ و ۲ در حالت‌های اول، دوم و سوم از جدول ۱.



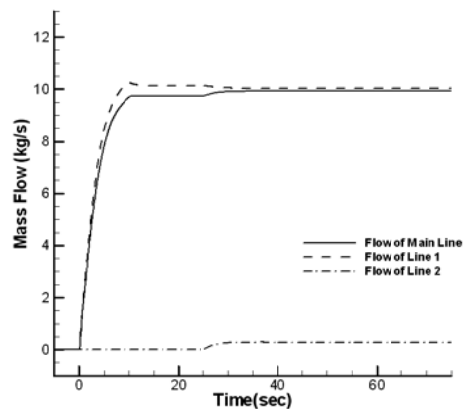
شکل (۹): تغییرات فشار پشت شیر کنترل مسیر اصلی در حالت‌های اول، دوم و سوم از جدول ۱.



شکل (۵): تغییرات موقعیت شیر کنترل مسیر اصلی، مسیر ۱ و مسیر ۲ در حالت اول از جدول ۱.

شکل ۶ تغییرات دبی خط اصلی، خط شماره ۱ و خط لوله شماره ۲ را در حین باز شدن شیرها در حالت اول از جدول ۱ نشان می‌دهد. در این حالت فشار ورودی ۲۱ بار و فشار P_1 برابر با ۱۲ بار و فشار P_2 برابر با ۱۴ بار در نظر گرفته شده است. شکل ۷ تغییرات فشار را در پشت شیر خط اصلی، محل انشعاب و در ورودی مخازن شماره ۱ و ۲ در حالت شماره ۱ از جدول ۱ نشان می‌دهد.

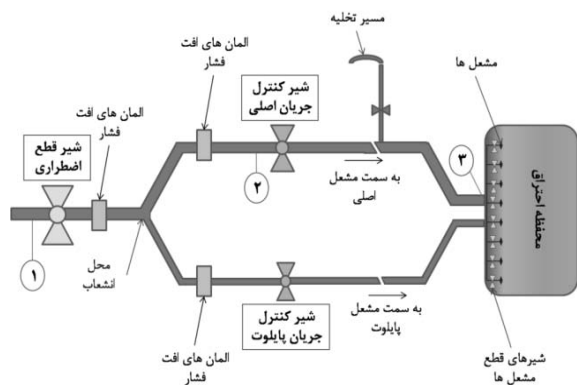
همچنین، شکل ۸ نمودار مقایسه‌ای از تغییرات دبی عبوری از خط اصلی را در همان فرآیند باز شدن شیرهای مسیر ۱ و ۲ در حالت‌های اول، دوم و سوم از جدول ۱ نشان می‌دهد. تفاوت این سه حالت در مقادیر فشار مخزن تخلیه شماره ۱ می‌باشد. شکل ۹ نیز تغییرات فشار پشت شیر کنترل مسیر اصلی را در همین شرایط نشان می‌دهد.



شکل (۶): تغییرات دبی خط اصلی، خط لوله ۱ و خط لوله ۲ در حین باز شدن شیرها در حالت اول از جدول ۱.

۵-۲- نتایج شبیه‌سازی نمونه صنعتی

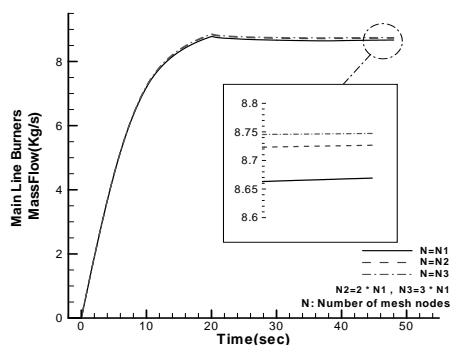
مدار مورد بررسی، مدار انتقال سوخت توربین گاز V94.2 زیمنس می‌باشد [۱۲] که شمای ساده شده این مدار در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل (۱۳): نمای ساده شده سیستم انتقال سوخت گازی توربین V94.2.

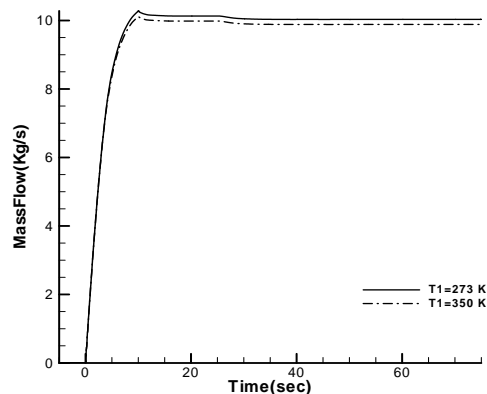
استقلال از شبکه حل

روش اختلاف محدود مک کورمک همان‌گونه که توضیح داده شد، یک روش مبنی بر شبکه‌بندی محیط حل می‌باشد. بنابراین، موضوع استقلال از شبکه حل در استفاده از این روش مهم خواهد بود. نتایج حل مسأله باز شدن شیرهای کنترلی در مدار شکل ۱۳، با سه شبکه حل متفاوت با هم مقایسه شده است. تفاوت این سه شبکه در تعداد نقاط شبکه می‌باشد. ابتدا مسأله با تعداد N_1 نقطه حل شده آنگاه تعداد نقاط حل را به N_2 نقطه و در نهایت به N_3 نقطه تغییر می‌یابد. $N_2=2N_1$ و $N_3=3N_1$ می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده مطابق شکل ۱۴ می‌باشد.

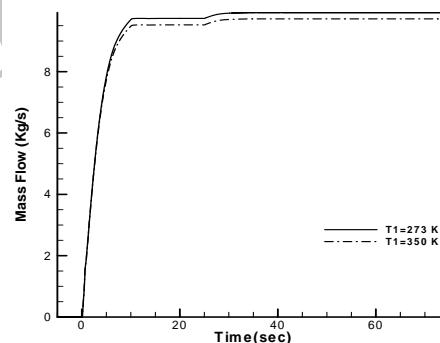


شکل (۱۴): نتایج حل مسأله با سه شبکه متفاوت.

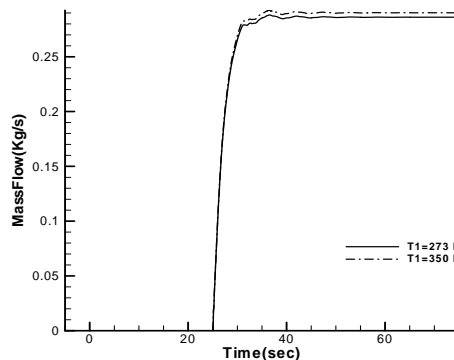
در شکل‌های ۱۰ - ۱۲ تغییرات دبی مسیر اصلی، مسیر شماره ۱ و مسیر شماره ۲ در حالت‌های اول و چهارم از جدول ۱ مقایسه شده است. تفاوت این دو حالت در مقدار دمای مخزن تخلیه شماره ۱ می‌باشد.



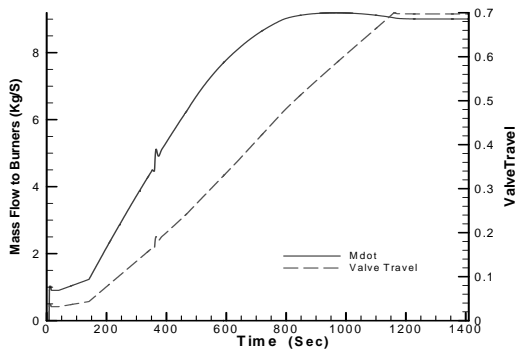
شکل (۱۰): مقایسه تغییرات دبی مسیر اصلی در حالت‌های اول و چهارم از جدول ۱.



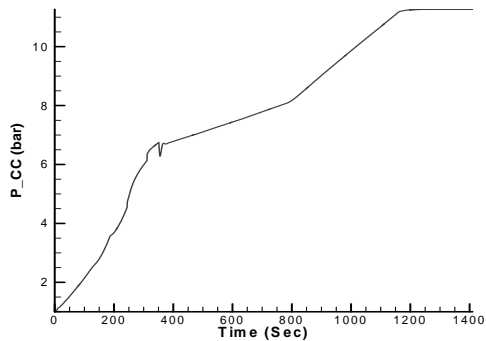
شکل (۱۱): مقایسه تغییرات دبی مسیر شماره ۱ در حالت‌های شماره اول و چهارم از جدول ۱.



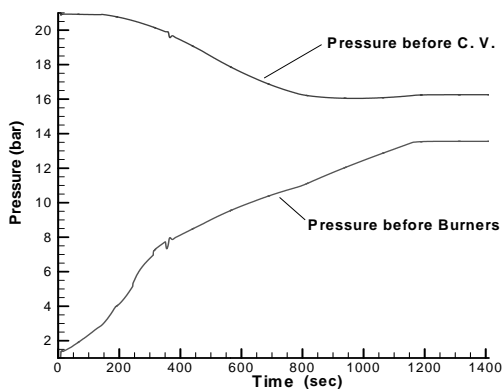
شکل (۱۲): مقایسه تغییرات دبی مسیر شماره ۲ در حالت‌های اول و چهارم از جدول ۱.



شکل (۱۶): نحوه تغییرات دبی در فرآیند راه‌اندازی.



شکل (۱۷): فشار محفظه احتراق در حین راه‌اندازی [۱۳].



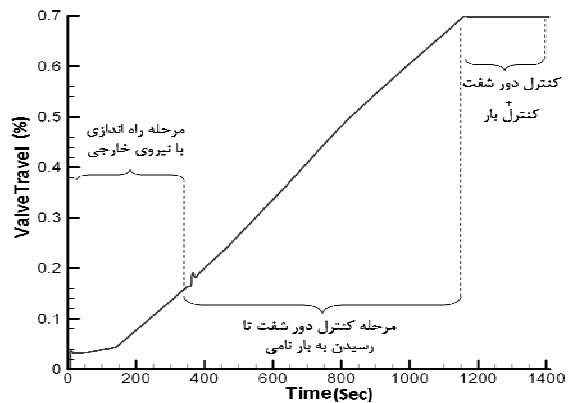
شکل (۱۸): تغییرات فشار در مقاطع ۲ و ۳ (پشت انژکتور و پشت شیر کنترل) در فرآیند راه‌اندازی.

شکل ۱۹ نحوه تغییرات عدد ماخ جریان در گلوگاه شیر کنترل را به همراه تغییرات موقعیت بازشدگی شیر و دبی عبوری از شیر در فرآیند راه‌اندازی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشخص است، تفاوت مقادیر به‌دست آمده با اعمال شبکه‌های مذکور برای جریان اصلی کمتر از ۱٪ بوده که مقدار قابل قبولی می‌باشد.

فرآیند راه‌اندازی

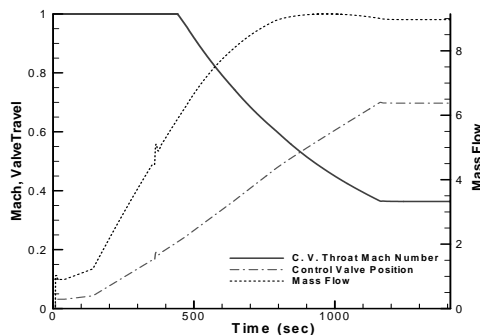
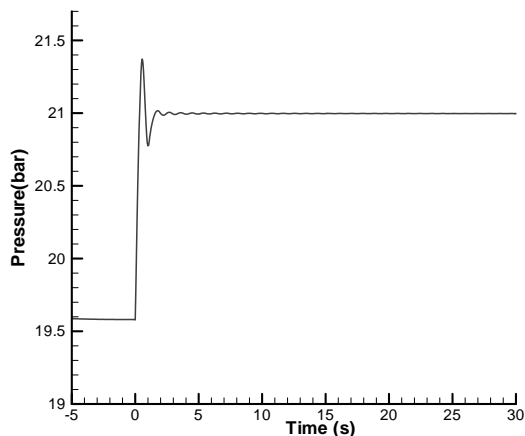
یکی از فرآیندهای مهم در روند کاری توربین گاز، فرآیند راه‌اندازی است. شروع راه‌اندازی و رساندن پارامترهای عملکردی توربین از حالت خاموشی به مقادیر نامی، فرآیند بسیار پیچیده‌ای است که نیازمند اعمال توابع پیچیده کنترلی می‌باشد که در اینجا مورد بحث نیستند. نمودار تغییرات میزان بازشدگی شیر در فرآیند راه‌اندازی مطابق شکل ۱۵ می‌باشد. در طی فرآیند راه‌اندازی توربین، مسیر پابلوت بطور کامل بسته بوده و محفظه احتراق در شرایط روند نفوذی کار می‌کند.



شکل (۱۵): تغییرات میزان بازشدگی شیر در فرآیند راه‌اندازی.

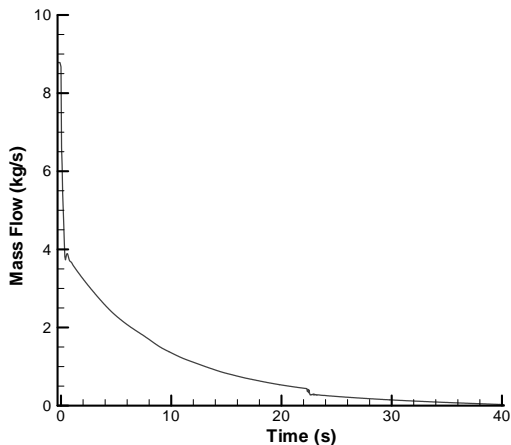
در این شرایط، تغییرات میزان دبی ورودی به محفظه احتراق در مقایسه با میزان بازشدگی شیر در نمودار شکل ۱۶ نشان داده شده است. این در حالی است که تغییرات فشار خروجی کمپرسور - که در واقع همان فشار محفظه احتراق به‌شمار می‌رود- با توجه به سوخت وارد شده به محفظه به کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی عملکرد توربین گاز [۱۳] به‌صورت شکل ۱۷ به‌دست آمده است.

همچنین، در این شرایط نحوه تغییرات فشار در مقاطع ۲ و ۳ (پشت انژکتور و پشت شیر کنترل) که در شکل ۱۸ نشان داده شده‌اند، به‌صورت شکل ۱۸ خواهد بود.

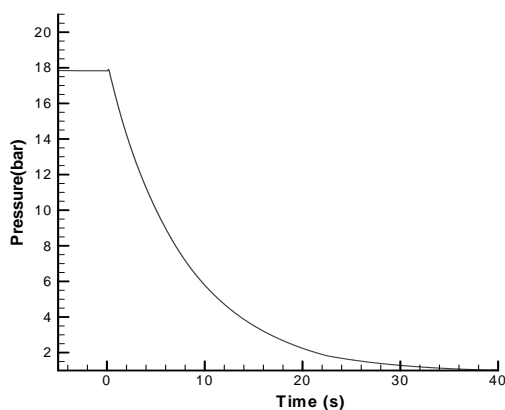


شکل (۱۹): عدد ماخ در گلوگاه شیر کنترل، موقعیت شیر و دبی عبوری از شیر در فرآیند راه‌اندازی.

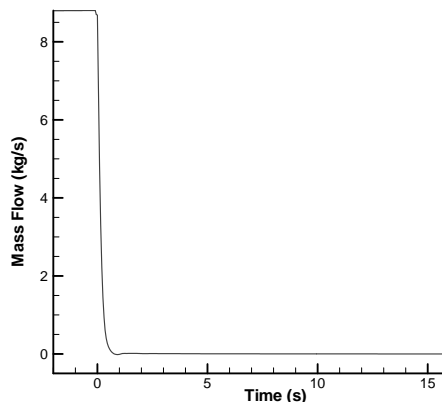
شکل (۲۱): فشار در مقطع ۱ در حین خاموشی اضطراری.



شکل (۲۲): تغییرات دبی در نقطه تخلیه گاز باقی‌مانده در خط اصلی در هنگام فرآیند خاموشی اضطراری.



شکل (۲۳): تغییرات فشار گاز باقی‌مانده در خط اصلی در حال تخلیه در زمان خاموشی اضطراری.



شکل (۲۴): دبی در مقطع ۱ در حین خاموشی اضطراری.

فرآیند خاموشی اضطراری

فرآیند خاموشی اضطراری زمانی اتفاق می‌افتد که توربین یا تجهیزات جانبی آن، تحت شرایط خاص اضطراری قرار بگیرند. بروز حوادث غیر مترقبه احتمالی، از جمله عوامل منجر به خاموشی اضطراری به‌شمار می‌روند. در فرآیند خاموشی اضطراری، ابتدا شیر قطع اضطراری به همراه شیرهای پشت انژکتورها در سریع‌ترین زمان ممکن بسته شده و به عبارت دیگر در حقیقت ابتدا و انتهای مسیر بسته می‌شوند. در این شرایط، با باز شدن شیرهای مسیر تخلیه، گاز باقی‌مانده در مسیر سوخت‌رسانی از طریق مسیر تعبیه شده به محیط اطراف تخلیه می‌گردد. شکل‌های ۲۰-۲۱ نحوه تغییرات دبی و فشار را در مقطع (۱) پشت شیر قطع اضطراری نشان می‌دهند. شکل‌های ۲۲-۲۳ نیز تغییرات دبی و فشار را در نقطه تخلیه گاز در حین فرآیند خاموشی اضطراری نشان می‌دهند.

محدود می‌باشد، لکن دقت مناسب نتایج امکان تعمیم آن را میسر می‌سازد.

جدول (۲): مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایش مدار انتقال گاز طبیعی توربین گاز V94.2.

ردیف	نوع داده	موقعیت شیر اصلی (%)	فشار پشت شیر اصلی (bar)	دبی جرمی (kg/s)
۱	آزمایش	۲۱/۳۸	۲۰/۲۰۵	۶/۲۵
	شبیه‌سازی		۱۹/۹۳	۶/۳۸۵
۲	آزمایش	۵۲/۷۴	۱۹/۹۰۷	۷/۸۸
	شبیه‌سازی		۱۹/۶۲	۷/۹۸

دلیل ایجاد اختلاف را می‌توان در مقادیر تقریبی افت فشار در المان‌هایی نظیر زانویی‌ها و شیرآلات و نیز در انجام فرضیات ساده‌سازی در ضرایب اصطکاک جریان در لوله‌ها جستجو کرد.

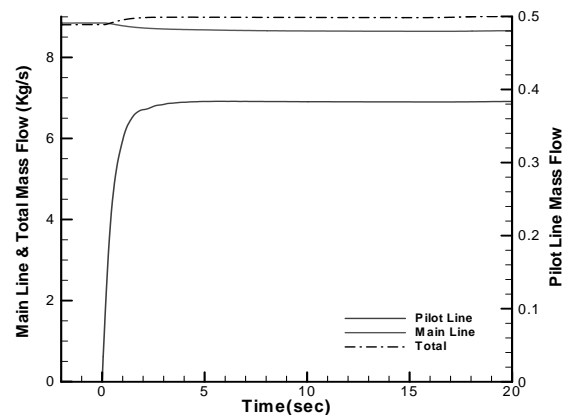
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی برای مدل‌سازی دینامیکی جریان سیال تراکم‌پذیر گاز ایده‌آل در عبور از خطوط لوله همراه با اصطکاک در حضور شیرهای کنترلی و انشعابات ارائه شد. روش تحلیل جریان، یک روش پیش‌رو در زمان صریح بوده که به کمک روش اختلاف محدود مک‌کورمک معادلات حاکم بر جریان را گسسته نموده و جریان را تحلیل می‌کند. همچنین در نقاط انشعاب از ترکیب دو روش مشخصه‌ها و روش اختلاف محدود مک‌کورمک استفاده شده است.

برای نمونه تئوری، با توجه به نتایج مشخص است که با باز شدن شیر مسیر انشعاب، جریان در این مسیر برقرار می‌شود. همچنین فشار در پشت شیر کاهش و فشار در پشت مخزن تخلیه به مرور افزایش می‌یابد. با باز شدن انشعاب دوم، جریان مسیر اصلی افزایش و دبی انشعاب اول کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان افت فشار ناشی از باز شدن شیر مسیر دوم که در نقطه انشعاب ایجاد شده دانست. همچنین نتایج بدست آمده مشخص می‌شود که با افزایش دما در مخزن پایین‌دست، دبی جریان در مسیر مربوطه و مسیر اصلی

باز شدن مسیر پایلوت

زمانی که مقدار توان خروجی توربین، به مقدار مشخصی برسد، برای افزایش توان خروجی باید روند کاری محفظه احتراق از روند نفوذ به روند پیش‌مخلوط^۱ تغییر یابد. لازمه این کار، باز شدن مسیر پایلوت است. این عمل با ارسال فرمان از کنترلر برای شیر کنترل پایلوت انجام می‌شود. در صورتی که فرض شود شیر کنترل مسیر اصلی در موقعیت ثابتی باقی بماند (که این موقعیت در اینجا مورد بحث نیست)، باز شدن مسیر پایلوت بر جریان عبوری از مسیر اصلی و همچنین کل دبی سوخت ورودی به محفظه احتراق تأثیر خواهد گذاشت. لازم به ذکر است که مسیر پایلوت مطابق شکل ۱۳ به موازات مسیر اصلی قرار گرفته است. در شکل ۲۴ نحوه تغییرات دبی عبوری از مسیر پایلوت، مسیر اصلی و دبی کل ورودی به توربین نشان داده شده است. شیر مسیر پایلوت تا ۷۰٪ باز شده است.



شکل (۲۴): تغییرات دبی مسیر اصلی و دبی کل در حین باز شدن مسیر پایلوت.

۵-۳- اعتبار بخشی به نتایج

نتایج حاصل از حل گذرا با نتایج حاصل از آزمایش در خط لوله واقعی توربین در حین یک فرآیند راه‌اندازی و در دو نقطه کاری مقایسه و اطلاعات حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی در جدول ۲ خلاصه شده است. با توجه به این جدول، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با دقت قابل قبولی با نتایج آزمایش مطابقت دارد. هر چند تعداد نقاط مقایسه، به دلایل فنی

بخش نیرو و پیشرانش شرکت پتروگاز خاورمیانه به خاطر همکاری‌ها و هم‌فکری‌های صمیمانه‌شان، تشکر نمایند.

مراجع

1. Lapple, C.E. "Isothermal and Adiabatic Flow of Compressible Fluids", Trans. Am. Inst. Eng., Vol. 39, No. 1, pp. 385-432, 1943.
2. Fincham, A.E. and Goldwater, M.H. "Simulation Models for Gas Transmission Networks", Transactions of the Ins. of Measurement and Control, Vol. 1, No. 1, pp. 3-13, 1979.
3. Thomas, P.J. "Simulation of Industrial Processes for Control Engineers", Elsevier Sci. & Tech. Books, Duisburg, 1999.
4. Price, G.R., McBrien, R.K., Rizopoulos, S.N., and Golshan, H. "Evaluating the Effective Friction Factor and Overall Heat Transfer Coefficient During Unsteady Pipeline Operation", J. Offshore Mech. and Arctic Eng., Vol. 121, No. 2, pp. 131-136, 1999.
5. Osiadacz, A.J. and Chaczikowsky, M. "Comparison of Isothermal and Non-isothermal Pipeline Gas Flow Models", J. Chemical Eng., Elsevier Sci., Vol. 81, No's. 1-3, pp. 41-51, 2000.
6. Gato, H. "Dynamic Behaviour of High-Pressure Natural-Gas Flow in Pipelines", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 26, No. 5, pp. 817-825, 2005.
7. Thorley A.R.D. and Tiley, C.H. "Unsteady and Transient Flow of Compressible Fluids in Pipelines-A Review of Theoretical and Some Experimental Studies", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 8, No. 1, pp. 3-15, 1987.
8. John, J.E.A. "Gas Dynamics", 2nd Ed., Prentice Hall, New Jersey 1984.
9. Anderson, J.D. "Computational Fluid Dynamics", McGraw Hill, New York, 1995.
10. "Control Valve Handbook", 2nd Ed., Fisher-Rosemount Ltd, Marshalltown, U.S.A., 1977.
11. Van Wylen, G.J., Sonntag, R.E., and Borgnakke, C. "Fundamentals of Thermodynamics", 5th Ed, John Wiley & Sons Canada Ltd, Toronto, Ontario, 1997.
12. "Siemens V94.2 Gas Turbine System Documentation", MAPNA Co, Tehran, Iran, 1985.
13. Middle East Petrogas Co. "Gas Turbine Transient Simulator Software", 2009.

کاسته می‌شود. اما دبی مسیر انشعاب دیگر در عین حال افزایش می‌یابد.

برای نمونه صنعتی، نتایج نشان می‌دهد که روش حل ارائه شده نتایج قابل قبولی را در مدل‌سازی فرآیندهای گذرابه‌دست می‌دهند. با باز کردن تدریجی شیر کنترل مسیر اصلی، مقدار دبی سوخت ورودی به محفظه احتراق به‌طور متناسب تغییر می‌کند. اما شیب این تغییرات متغیر است. این بدان معنی است که تغییرات دبی، با تغییرات موقعیت شیر کنترل رابطه خطی ندارد. چراکه مقدار دبی عبوری از شیر کنترل، به مساحت لحظه‌ای گلوگاه شیر و ریشه دوم اختلاف فشار ورودی و خروجی شیر بستگی دارد. همچنین هر چه فشار محفظه بالاتر باشد، در شرایط یکسان، دبی کمتری از مدار عبور خواهد نمود.

در فرآیند راه‌اندازی، فشار پشت شیر کنترل در حین باز شدن کاهش یافته و فشار پشت انژکتورهای پاشش سوخت سیر صعودی خواهد داشت. همچنین در ابتدای باز شدن شیر، شیر در شرایط خفگی قرار دارد. با باز شدن تدریجی شیر، شرایط خفگی برطرف خواهد شد.

در نتایج مدل‌سازی فرآیند باز شدن مسیر پایلوت، نتایج نشان می‌دهد که با باز شدن شیر مسیر پایلوت، دبی سوخت در این مسیر جریان پیدا کرده و زیاد می‌شود. در عین حال دبی عبوری از مسیر اصلی هم‌زمان، تا اندازه‌ای روند نزولی خواهد داشت. چرا که با کاهش بیشتر فشار در بالادست شیر کنترل مسیر اصلی، مقدار دبی عبوری از این مسیر به مقدار اندکی افت می‌کند. این در حالی است که با ایجاد این افت فشار، مقدار دبی کل عبوری از مدار افزایش می‌یابد.

در پایان می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با توجه به تطابق قابل قبول نتایج تئوری و تجربی بدست‌آمده، از روش‌های ارائه شده در این تحقیق می‌توان در مدل‌سازی خطوط انتقال سیال تراکم‌پذیر به‌خصوص شبکه‌های انتقال گاز و نیز بررسی رفتار سیال در این شبکه‌ها در هنگام اجرای فرآیندهای گذرا استفاده نمود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، وظیفه خود می‌دانند که از آقایان مهندس بهنام رضایی و مهندس هیوا خالدی و نیز کارشناسان